

## 5상 1.5kW 농형 유도전동기의 운전특성

(Operating Characteristics of Squirrel-Cage Induction Motor of 5-Phase 1.5kW)

김민회\* · 정형우 · 송현직

(Min-Huei Kim · Hyung-Woo Jung · Hyun-Jig Song)

### Abstract

This paper presents an improved operating characteristics of squirrel-cage induction motor(IM) for 5-phase 1.5kW, 220V, 60Hz in order to study a polyphase AC machinery that keep hold of advantages more than traditional three-phase a IM, such as reducing a amplitude of torque pulsation, decreasing electric noises, and increasing the reliability. The developed manufacturing motor was necessary to do improvement of speed regulation, efficiency, operating characteristics, and so on at rated load. There are remake a redesigned and distributed stator winding connection without changing the frames of stator and rotor core in previous established the motor by a repeat tests. There are shown a experiments results of no-load test, locked rotor test, operating characteristics at variable load, FFT analysis of harmonics within output voltages and current waveform, decided motor parameters.

Key Words : Five-Phase IM, Operating Characteristics, No-Load Test, Locked Rotor Test, FFT Analysis

### 1. 서 론

최근 전력용 반도체소자의 발달과 고성능 프로세서의 개발로 인해 전력전자분야의 기술이 비약적으로 발전함에 따라 신뢰성이 우수한 고성능, 저비용 전압 및 주파수 변환장치들의 실용화가 가능해졌다. 또한

다양한 전동기 제어기법의 개발로 인해 가변속 전동기 구동시스템에 주로 적용되던 직류전동기 대신 농형 유도전동기 또는 영구자석 동기전동기인 교류전동기를 사용하여 고성능 구동시스템에 적용하는 것이 보편화되고 있는 추세이다. 현재 보편화된 가변속 전동기 구동시스템에는 3상 농형 유도전동기가 적용되고 있으나, 최근 3상 전동기 구동시스템에 비해 운전특성이 우수한 다상 전동기 제어시스템에 관한 관심이 고조되고 있으며, 11상(eleven-phase) 농형 유도전동기에 관한 연구 결과도 보고되고 있다[1-7].

다상 교류 전동기는 일반적으로 산업분야에서 가장 많이 사용되고 있는 삼상 전동기에 비해서 다음과 같은 장 단점을 가진다.

\* 주(교신)저자 : 영남이공대학교 전기자동화과 교수  
\* Main(Corresponding) author : Yeungnam College of Science & Technology, Dept. of Electrical Automatic Engineering, Professor  
Tel : 053-650-9263, Fax : 053-624-4767  
E-mail : mhkim@ync.ac.kr  
접수일자 : 2014년 2월 10일  
1차심사 : 2014년 2월 14일  
심사완료 : 2014년 3월 5일

- 같은 출력에서 상당 전압의 변화 없이 상당 전류의 크기를 감소할 수 있다.
- 토크의 맥동주파수를 증가시킴으로써 토크 리플을 감소할 수 있다.
- 전동기의 정격전력의 변화 없이 상당 토크 크기를 감소할 수 있다.
- 구동장치인 인버터의 직류 링크 전류의 고조파 성분을 저감할 수 있다.
- 회전자의 고조파 전류가 저감된다.
- 시스템의 신뢰성을 증가시킬 수 있다.
- 고조파 전류의 주입이 가능하다.
- 운전의 자유도가 증가된다.
- 구동용 전원장치의 스위칭 소자가 증가된다.
- 제어시스템을 적합한 형태로 재구성해야 한다.

5상 전동기를 비롯한 다상 교류전동기는 하이브리드 전기자동차, 항공기, 선박 추진시스템, 군사용 장치 구동시스템 등의 분야에서 기존의 3상 전동기를 대체할 차세대 전동기에 대한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다[8-10].

전동기의 설계와 제작에 있어서는 5상 유도전동기는 3상 전동기에 비해 구조적으로 집중권의 고정자 권선 채택과 전동기로 유입되는 전류의 파형이 사다리꼴 형태로 확연한 차이를 지니고 있으므로, 고정자 권선이 집중권선 형태인 5상 전동기의 회전자 좌표 기준의 벡터제어에 대한 연구도 이루어지고 있다[11-14].

5상 유도전동기의 특성은 분포권을 사용하지 않고 집중권을 사용하며, 3차 공간 고조파 성분을 포함하고 있으므로 사다리꼴 형태의 역기전력을 나타내게 된다. 또한 제3 고조파 전류성분의 주입으로 인해서 높은 전력밀도를 가질 수 있으며, 15% 정도의 출력 토크 상승을 가져오게 된다[15-16].

일반적으로 많이 사용되고 있는 3상 유도전동기 보다 많은 특성을 가지는 다상 교류 전동기의 연구를 위하여, 5상 1.5kW, 220V, 60Hz 농형 유도전동기를 시험용으로 개발한 연구결과가 발표된바 있다[17]. 보고된 5상 전동기는 정격운전에서 전압변동률, 속도변동률, 역율, 효율 및 운전특성 등이 많이 저하되어, 이에 대한 문제점의 개선에 대한 연구를 요구하고 있었다.

따라서 본 연구에서는 기존에 개발된 고정자와 회전자의 철심의 구조는 변화하지 않고 그대로 고정된 상태를 유지하면서, 고정자권선의 재설계와 제작을 되풀이하는 시행오차 법에 의해 전동기를 설계 제작하여 정밀 시험을 통하여 운전특성이 개선된 연구결과에 대하여 고찰한다.

## 2. 5상 농형유도전동기의 수학적 모델

### 2.1. 전압방정식

5상 2극 교류기 고정자 권선의 각 상은 공간적으로 72도의 위상차를 가진 N턴의 집중권으로 구성되는 경우, 고정자 권선분포도는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 권선의 역기전력과 전류파형은 그림 2에서 보는 바와 같이 역기전력은 사다리꼴 형태로, 전류는 제 3고조파 성분이 포함되고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 5상 유도전동기의 수학적 모델은 a b c d e의 기준 좌표계상에서 행렬 형태의 고정자 전압 전류와 쇄교자속 및 운동 방정식은 간략하게 표현될 수 있다[2].

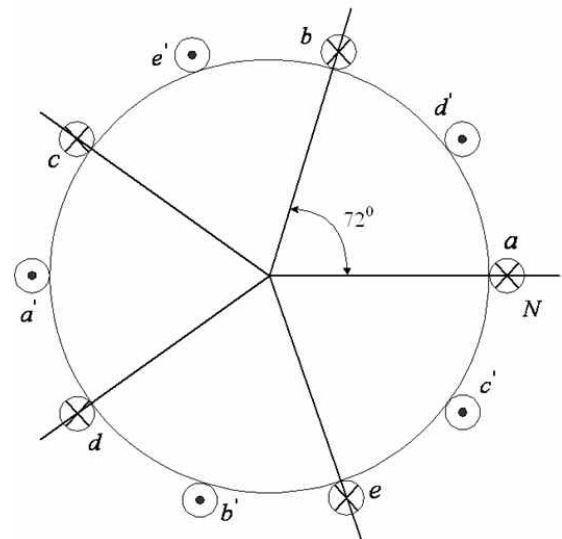


그림 1. 집중권으로 구성된 5상 2극 농형 유도전동기의 권선 분포도

Fig. 1. Five-phase concentrated winding of squirrel-cage IM

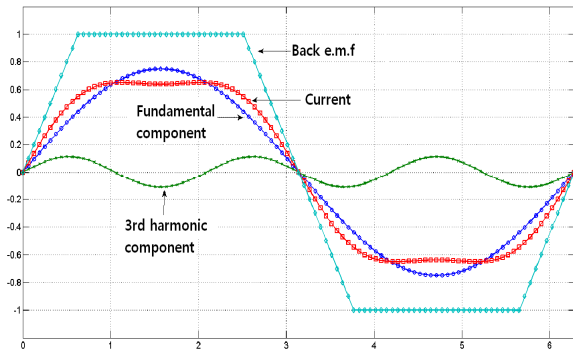


그림 2. 5상 유도전동기의 역기전압과 전류파형  
Fig. 2. Back-EMF and current waveform of five-phase induction motor

### 2.2 고조파 해석

5상 교류기의 고조파 성분의 해석을 위하여, 정상상태에서 자계의 중첩 허용을 위해 포화현상과 표피효과를 무시하면, 그림 3과 같이 a상 좌표축의 권선함수  $N(\phi)$ 는 식 (1)로, 전류파형은 식 (2)로, 3상 합성 기자력은 식 (3)으로 표시된다.

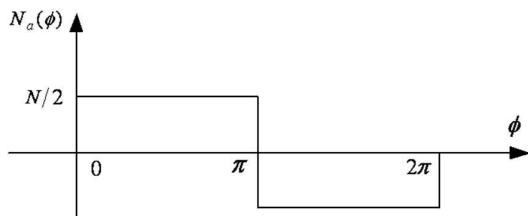


그림 3. 5상 교류기의 a상 권선함수  
Fig. 3. Winding function for a-phase of five-phase IM

$$N(\phi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{n\pi}\right) \left(\frac{N}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos n(\phi + \alpha), n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$$i_a(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{4}{m\pi}\right) I_m \cos(m\beta) \sin(m\theta + \delta), m = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

$$F = N_a I_a + N_b I_b + N_c I_c + N_d I_d + N_e I_e \quad (3)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1}{nm}\right) \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \left(\frac{NI_m}{2}\right) \cos\left(\frac{m\pi}{10}\right) ((\cos(m\omega t - n\psi) (\cos\frac{(m-n)2\pi}{5} + \cos\frac{(m-n)4\pi}{5} + \frac{1}{2}))$$

여기서  $\theta = \omega t, \beta = \pi/10$ 이며,  $\phi$ 는 공간각도,  $\alpha$ 는 상과 상 사이의 공간각도이며,  $n, m$ 은 고조파의 차수이다.

5상 유도전동기는 그림 2의 5상 전동기 등가회로에서 나타난 바와 같이, 구조적으로 기본파 성분의 등가회로와 제3 공간 고조파 성분의 등가회로가 각각 존재한다. 따라서 제3 고조파 성분을 포함하고 있기 때문에 제3 고조파 성분 전류를 제어하지 않으면 그림 2와 같이 제3 고조파 전류성분이 전동기에 유입되고, 이러한 성분은 그림에서 보는 바와 같이 전류파형의 왜곡을 만들어 낼 수도 있다. 따라서 전동기의 정밀제어를 위해서는 제3 고조파 전류성분 영향의 최소화가 요구되며, 이 영향을 해결하기 위하여 순수한 기본파 성분의 상전류를 만들기 위하여 여러 가지 연구들이 이루어지고 있다[13-15].

### 3. 적용된 5상 농형 전동기의 특성

Maxwell 2D와 Simplorer를 사용하여 연구용으로 개발된 전동기는 5상 220V, 60Hz, 1.5kW으로 최종적으로 재설계하여 개발된 규격과 특성은 표 1과 같다 [17, 19]. 그림 4는 설계된 고정자와 회전자 철심의 형태를 보여준다.

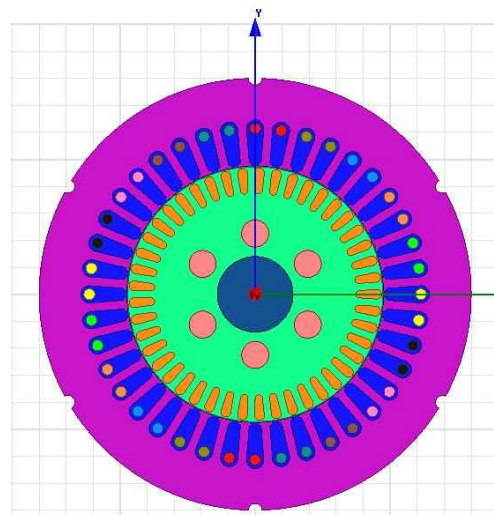


그림 4. 설계된 고정자와 회전자 철심의 구조  
Fig. 4. Structure of designed stator and rotor core by Maxwell 2D

표 1. 설계 제작된 농형 유도전동기의 특성  
Table 1. Specifications of designed squirrel-cage 5-phase IM

구분	규격	구분	규격
정격출력	1.5kW	고정자 외경	160.00mm
정격전압	220V	고정자 내경	95.00mm
정격전류	9.475A	회전자 외경	94.40mm
정격주파수	60Hz	회전자 내경	16.67mm
극수	4극	고정자 슬롯 수	40개
정격회전수	1720rpm	회전자 슬롯 수	45개
역율	78.0%	고정자 코일턴수	0.8mm×85turn
효율	90.01%	코일 배치	집중권
공극	0.6mm	강판 두께	0.5mm
적층 두께	85mm	철심 재질	S-50

### 4. 실험장치 구성

5상 농형 유도전동기의 운전특성을 측정하기 위하여 그림 5와 같은 시험장치도를 구성하였다. 안정된 5상 전원을 얻기 위하여 실험용으로 220V, 60Hz, 5.0kW 표면부착형 동기전동기(SPMSG)를 개발하여 사용하였다[2-4]. SPMSG는 영구자속을 사용하고 있어 자속을 가변할 수 없으므로 발전기의 출력전압의 조정은 전압조정기를 사용하여 제어하여야 한다[2].

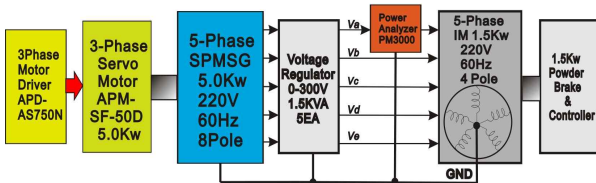


그림 5. 실험장치 블럭도  
Fig. 5. Block Diagram of experimental apparatus

### 5. 개발된 전동기 특성 측정

#### 5.1 고정자 권선특성 측정

HP4263A LCR meter를 사용하여 각 상 권선의 저항( $R_s$ )과 누설 인덕턴스( $L_{ls}$ )를 정확하게 측정하기 위하여, 회전자의 위치를 바꾸어 가면서 각상의 특성을 3회 측정하여 총 15회(3회 x 5상) 측정한 결과를 평균한 값은 다음과 같다[18].

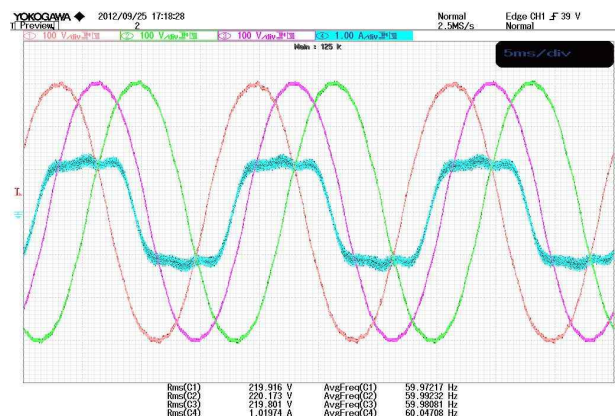
- 고정자(1차) 권선 저항:  $R_{s23} = 6.450\Omega / 23^\circ C$
- 주위온도  $75[^\circ C]$ 로 환산:  $R_{s75} = 7.7525\Omega / 75^\circ C$
- 고정자(1차) 누설 인덕턴스:  $L_{ls} = 68.88mH$
- 고정자(1차) 누설 리액턴스:  $X_{ls} = 25.97\Omega(60Hz)$

### 5.2 무부하 시험 결과

그림 5와 같은 측정 장치에서 무부하 시험한 결과는 표 2와 같다. 여기에서 적용한 값은 무부하 전압 220V, 무부하 전류: 5.010A, 한 상당 무부하 전류 1.002A, 무부하 공급전력 79W, 피상전력 1,098VA으로 결정하였다. 그림 6 (a)은 무부하 실험에서 얻어진 a, b, c상의 상 전압과 a상의 전류 파형이며, (b)는 a상의 역기전력의 전압파형에 포함된 고조파 성분을 PSIM 프로그램을 사용하여 분석한 결과를, (c)는 a상의 선전류 파형에 포함된 고조파 성분을 분석한 결과를 보여준다.

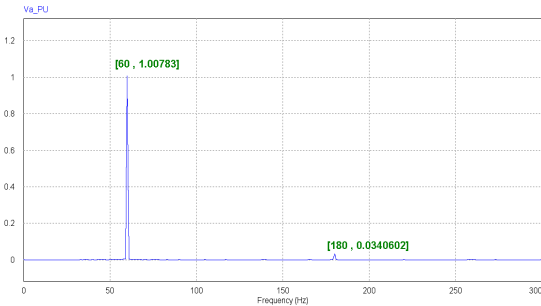
표 2. 무부하 시험 결과  
Table 2. Results of no-load test

구분	선전류 A	상전압 V	역율 %	VA Var	입력 W	회전수 rpm
A 상	1.0193	220.20	0.059	224.6	14.172	1799.3
B 상	0.9734	220.00	0.080	214.3	17.921	1799.3
C 상	0.9980	220.00	0.066	219.3	14.921	1799.3
D 상	0.9919	220.36	0.070	221.0	15.621	1799.3
E 상	1.0271	220.26	0.068	219.2	16.335	1799.3
평균	1.000	220.16	0.069	219.68	15.79	1,799.3

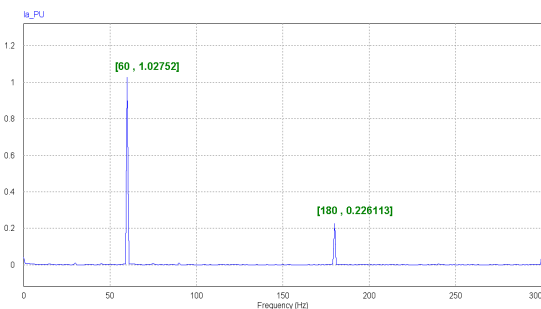


(a) a, b, c상의 상 전압과 a상 전류파형  
(a) Waveform of phase voltage on a, b, c-phase and line current of a-phase

5상 1.5kW 농형 유도전동기의 운전특성



(b) a상 역기전력의 고조파 분석 결과  
(b) FFT analysis result of a-phase back-EMF



(c) a상 선전류의 고조파 분석 결과  
(c) FFT analysis result of a-phase line current

그림 6. 무부하 실험에서 상 전압, 전류파형, 고조파 분석  
Fig. 6. Waveform of phase voltage and line current, and FFT analysis results at no-load test

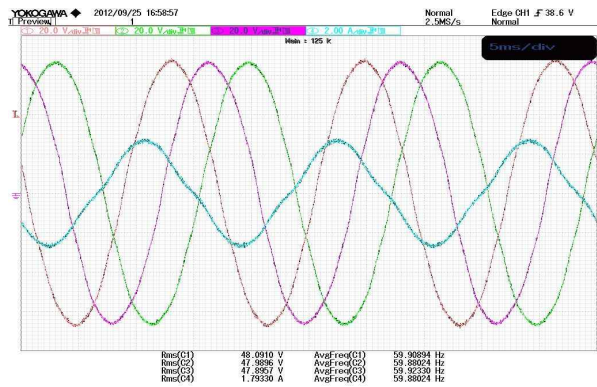
5.3 구속 시험 결과

같은 실험 장치로 구속 시험하여 얻어진 결과는 표 3과 같다. 여기에서 적용한 값은, 구속전압 48.1V, 정격전류 9.571A, 한 상당 구속전류 1.914A, 구속전력 268W, 피상전력 464VA, 역률 0.58%로 결정하였다. 그림 7은 구속 시험시 a, b, c상의 상 전압과 a상의 전류 파형 및 고조파 성분을 분석한 결과이다.

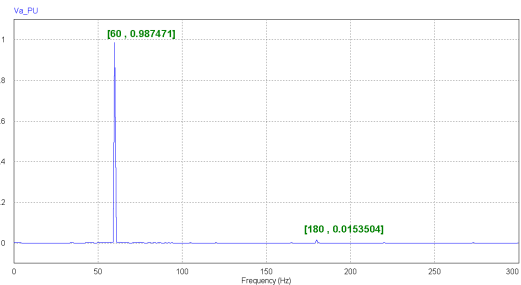
표 3. 구속 시험 결과  
Table 3. Results of locked rotor test

구분	상전압 V	선전류 A	역률 %	피상전력 VA	전력 W
A상	48.11	2.009	0.597	96.65	58.01
B상	48.21	1.919	0.577	96.65	53.40
C상	48.26	1.894	0.569	91.40	51.70

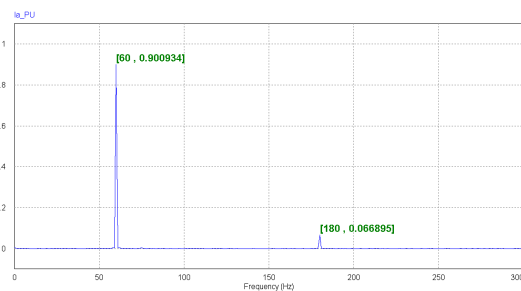
구분	상전압 V	선전류 A	역률 %	피상전력 VA	전력 W
D상	47.99	1.956	0.592	93.87	55.40
E상	47.89	1.793	0.561	85.87	49.24
평균	48.09	1.910	0.579	92.89	53.55



(a) a, b, c상의 상 전압과 a상 전류파형  
(a) Waveform of phase voltage on a, b, c-phase and line current of a-phase



(b) a상 역기전력의 고조파 분석 결과  
(b) FFT analysis result of a-phase back-EMF



(c) a상 선전류의 고조파 분석 결과  
(c) FFT analysis result of a-phase line current

그림 7. 구속 실험에서 상 전압과 전류파형 및 고조파 분석  
Fig. 7. Waveform of phase voltage and line current, and FFT analysis results at locked rotor test

### 5.4 전동기의 운전 특성

그림 5과 같은 실험 장치에서 파우더 브레이크를 제어하여 부하를 가면하면서 한 상당 전동기에 공급되는 전류와 전압, 3상 부하전력, 전동기 토크, 전동기의 회전수 등을 측정된 결과는 표 4와 같다. 그림 8은 부하변화에 따른 효율 변화곡선을 보여주는 그래프이다. 그림 9는 전동기의 부하를 6.0N.m를 안가하였을 때 a, b, c상 전압파형과 a상 전류파형이다.

표 4. 전동기의 가변 부하시험에서 운전특성 결과  
Table 4. Operating characteristics results of the motor at variable load

부하	공급전압 V	상전류 A	공급전력 W	역율 %	출력 W	회전수 rpm	슬립 %	토크 N.m	효율 %
무부하	220.04	5.00	268	0.07	0	1792	0.40	0/0	0
1/4 부하	219.90	5.33	445	0.36	365	1780	1.11	1.961	81.97
1/2 부하	219.86	6.40	832	0.58	741	1761	2.17	4.021	90.24
3/4 부하	220.09	7.75	1202	0.70	1089	1740	3.33	5.982	90.63
정격 부하	220.16	9.33	1567	0.78	1412	1720	4.44	7.845	90.01
10% 과부하	219.72	10.5	1808	0.81	1552	1690	6.11	9.022	85.84
20% 과부하	220.28	11.5	2028	0.82	1680	1681	6.61	10.003	83.04

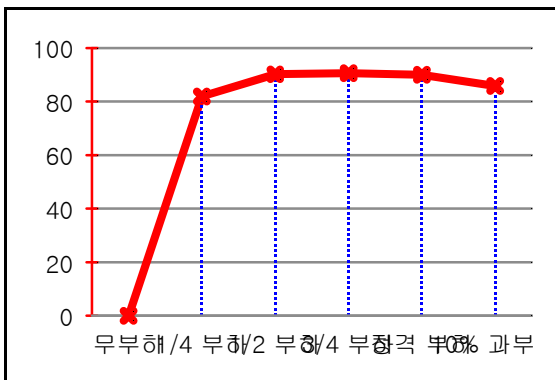


그림 8. 효율 특성 곡선  
Fig. 8. Efficiency characteristics curve

### 6. 전동기 정수 산정 결과

저항측정에서 얻어진 고정자 권선의 임피던스  $Z_1 = R_r + jX_{l1} = 7.752 + j25.97$ 와 무부하 시험 및 구속

시험에서 얻어진 결과를 사용하여 결정된 1.5kW, 220V, 60Hz 5상 농형 유도전동기의 정수는 표 5와 같이 결정되었다.

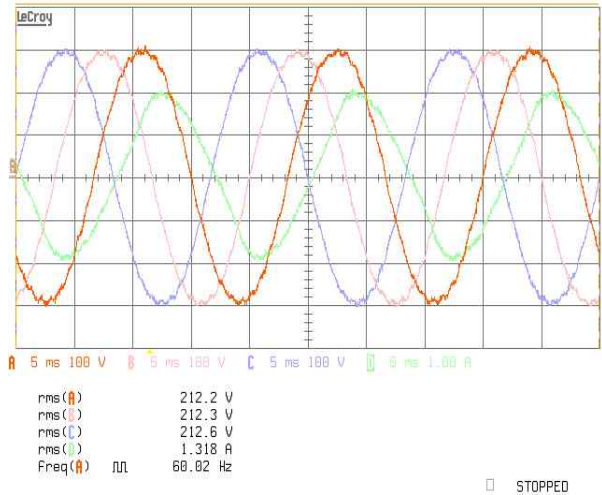


그림 9. 부하토크가 6.0N.m인 정격의 3/4의 실 부하에서 a, b, c상 전압파형과 a상 전류파형

Fig. 9. Waveform of a, b, c-phase voltage and a-phase current at 6.0N.m load torque

표 5. 결정된 전동기 정수  
Table 5. Obtained motor parameters

$R_s$ [ $\Omega$ ]	$R_r$ [ $\Omega$ ]	$R_m$ [ $\Omega$ ]	$L_m$ [mH]	$L_{ls}$ [mH]	$L_{lr}$ [mH]	$X_m$ [ $\Omega$ ]	$X_{ls}$ [ $\Omega$ ]	$X_{lr}$ [ $\Omega$ ]
7.752	6.868	7.769	511.81	68.88	13.18	192.95	25.97	4.97

### 7. 개발된 전동기의 특성 검토

재설계하여 제작된 5상 농형 유도전동기의 운전특성을 조사한 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 설계 제작에 의해 적용된 전동기의 특성은 표 2와 같다.
- 표 2에서 무부하시 속도가 1799rpm이며, 표 4에서 정격부하에서 속도가 1720rpm이므로, 속도변동률은 4.6%이다.
- 그림 7의 무부하 시험에서 측정된 전동기의 역기전력 파형을 FFT로 분석한 결과, 역기전력의 전압파형에 포함된 제3 고조파 성분은 3.41%이며,



- 부하전류에 포함된 제3 고조파 성분은 22.61%임을 알 수 있다.
- 그림 8의 구속시험 결과에서 역기전력과 전류 파형을 FFT로 분석한 결과, 전압파형에 포함된 THD 1.25%이며, 전류에 포함된 THD는 10.00%임을 알 수 있다.
- 전기동력계를 사용하여 부하특성 시험결과는 표4와 같으며, 정격에서 역율은 78.0%이며, 효율은 90.01%가 됨을 알 수 있다.
- 그림 9에서 적용된 전동기의 효율특성을 보여준다.
- 전동기의 특성시험 결과를 사용하여 개발된 전동기의 정수는 표 5와 같이 결정된다.
- 본 연구에서 제시된 5상 농형 유도전동기의 운전특성을 고찰한 결과 연구용으로 적용함에 있어 문제점이 없이 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 8. 결 론

일반적으로 많이 사용되고 있는 교류용 단상 및 3상 전동기 보다 많은 장점의 특성을 가지는 5상 1.5kW 220V 60Hz 농형 유도전동기를 Maxwell 2D과 전동기 해석 프로그램을 활용하여 설계 제작하여 개발하였다. 개발된 농형 유도전동기는 시험용으로 적용하기에는 운전특성이 떨어지므로 특성개선이 요구됨에 따라 개선을 위한 권선의 채설계 및 제작 기술과 특성 실험을 통해 개발된 전동기의 운전특성을 제시하였다. 개선된 전동기는 속도변동률 4.6%, 역율 78.0%, 효율 90.01%의 특성을 가진다. 따라서 개발된 5상 농형 유도전동기를 사용하여 전동기 연구에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## References

[1] Ayman S, Abdel-Khalik, Mahmoud I. Masoud, and Barry W. Williams, "Improved Flux Pattern With Third Harmonic Injection for Multiphase Induction Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, pp. 1563-1758, March 2012.

[2] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim and Dong-Hee Kim, "A Development of Surface Permanent Mount Synchronous Generator for Five-Phase 5kW", JKIEE, Vol. 26, No. 11, pp. 87-96, 2012.

[3] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim, Hyun-Jik Song and Dong-Hee Kim, "An Operating Characteristics of Surface Permanent Magnetic Synchronous Generator for Five-Phase 5kW", JKIEE, Vol. 27, No. 7, pp. 9-16, 2013.

[4] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim, Hyun-jik Song and Dong-Hee Kim, "An Improved Characteristics of Surface Permanent Magnetic Synchronous Generator for Five-Phase 5kW", JKIEE, Vol. 27, No. 9, pp. 53-61, 2013.

[5] Hyung-Min Ryu, Jang-Hwan Kim and Seung-Ki Sul, "Analysis of Multiphase Space Vector Pulse-Width Modulation Based on Multiple d-q Spaces Concept", IEEE Trans. on Power Electronics Vol. 20, No.6, pp. 1364-1371, November 2005.

[6] Min-Huei Kim, Nam-Hun kim and Won-Sik Baik, "A Five-Phase IM Vector Control System Including 3rd Current Harmonics Component", 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, pp. 2519-2524, May 2011.

[7] Leila. Parsa and Hamid. A. Toliyat, "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives for Ship Propulsion Applications," 2005 Electric Ship Technologies Symposium, pp. 371-378, 2005.

[8] S. Sadeghi and L. Parsa, "Design and Dynamic Simulation of Five Phase Interior Permanent Magnet Machine for Series Hybrid Electric Vehicles," 2010 Green Technologies Conference, pp. 1 - 6, 2010.

[9] N. Bianchi and S. Bolognani, "Strategies for the Fault Tolerant Current Control of a Five-Phase Permanent-Magnet Motor", IEEE Transactions. on Industry Applications, Vol. 43, pp. 960-970, 2007.

[10] Leila. Parsa and Hamid. A. Toliyat, "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, pp. 30-37, Jan/Feb 2005.

[11] Nam-Hun Kim and Min-Huei Kim, "Modified Direct Torque Control System of Five Phase Induction Motor" JEET, Vol. 4, No. 2, pp. 266-271, 2009.

[12] Min-Huei Kim and Nam-Hun Kim, "A Speed Control Characteristics for Five-Phase Squirrel-cage Induction Motor Injecting 3rd Current Harmonics Component", The Transaction of KIPE, Vol. 18, NO. 3, pp. 279-288, June 2013.

[13] Min-Huei Kim, Nam-Hun kim, Won-Sik Baik, "A Five-Phase Induction Motor Speed Control System Excluding Effects of 3rd Current Harmonics Component", Journal of Power Electronics, Vol. 11, NO. 3, May 2011.

[14] Shuai Lu, K. Corzine, "Direct Torque Control of Five-phase Induction Motor using Space Vector Modulation with Harmonics Elimination and Optimal Switching Sequence", APEC '06, pp. 195-201, 2006.

[15] M. J. Duran, F. Salas, M.R. Arahal, "Bifurcation Analysis of Five-Phase Induction Motor Drives with Third Harmonic Injection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.

- 55, pp. 2006-2014, 2008.
- [16] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives." Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 1996.
- [17] Min-Huei Kim, Hyung-Woo Jung and Hyun-Jik Song, "A Development of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor 1.5 kW", JKIEE, Vol. 28, No. 01, pp. 57-68, 2014.
- [18] Min-Huei Kim, "Parameters Estimation of Five-Phase Squirrel-Cage Induction Motor", KIEE, Vol. 61P, No. 4, pp. 199-205, 2012.
- [19] ANSYS, "Maxwell 2D/3D User's Guide with Simplorer and Ansoft RMXprt" ANSYS Korea, 2010.

◇ 저자소개 ◇



**김민회(金玟會)**

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979년 3월~현재 영남이공대학교 전기자동화과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구 교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수논문상 수상. 현재 IEEE Senior Member. 1998~2006년 전력전자학회 이사, 부회장, 감사, 전동력응용연구회 위원장 역임. 현재 본 학회 중신회원.



**정형우(鄭亨遇)**

1961년 6월 23일생. 2006년 2월 경일대 전기과 졸업. 2008년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기공학과 박사 과정 수료. 1988~2000년 LG 산전 구매부 근무. 1991년 1월~현재 신한기전 대표. 2006년~현재 영남이공대학교 전기자동화과

겸임 교수.



**송현직(宋炫直)**

1968년 7월 30일생. 1991년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1993년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2006년~현재 영남이공대학 전기자동화과 부교수. 현재 한국조명·전기설비학회

대구경북지회 이사.